نشریه ماشین‌های کشاورزی
جلد ۱۰، شماره ۲، نیمسال دوم ۱۳۹۹، ص ۱۵۳-۱۴۱

Journal of Agricultural Machinery
Vol. 10, No. 2, Fall- Winter 2020, p. 141-153

# مکان‌یابی و ایجاد نقشه هم‌زمان در محیط گلخانه با استفاده از بینایی استریو

زهرا خسروبیگی[1]، شاهین رفیعی[2]*، سید سعید محتسبی[3]، امین نصیری[4]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۱۰/۱۳
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۱۲/۱۵

## چکیده

مکان‌یابی و ایجاد نقشه هم‌زمان (SLAM) گامی ضروری در خودکار نمودن عملیات‌های کشاورزی و در نتیجه اعمال کشاورزی دقیق می‌باشد. در این تحقیق با استفاده از یک دوربین استریو به مکان‌یابی و ایجاد نقشه هم‌زمان در محیط گلخانه با استفاده از چارچوب راس پرداخته شد. قبل از تهیه تصاویر استریو از محیط گلخانه دوربین کالیبره شده و مسیر حرکت دوربین در گلخانه طراحی و اعمال شد. مسیر طراحی شده دارای طول ۳۲/۷ متر و تعداد تصاویر گرفته شده در این مسیر ۱۵۰ جفت تصویر استریو بود. جهت ارزیابی الگوریتم طراحی شده، میزان خطای مکان‌های تخمین زده شده به‌وسیله الگوریتم با مکان‌های واقعی دوربین استریو با استفاده از فاصله اقلیدسی محاسبه شد. نتایج حاصل از این تحقیق نشان داد که الگوریتم معرفی شده دارای میانگین خطای مکان‌یابی ۰/۰۶۷۹۴۱۲ متر، انحراف معیار ۰/۰۴۵۶۴۳۱ متر و ریشه میانگین مربع خطای ۰/۰۰۷۵۵۶۹ متر برای مسافت ۳۲/۷ متری پیموده شده توسط دوربین استریو می‌باشد.

**واژه‌های کلیدی:** بینایی استریو، راس، گلخانه، مکان‌یابی و ایجاد نقشه هم‌زمان (SLAM)

## مقدمه

به‌کارگیری کشاورزی دقیق در تولید محصولات کشاورزی امری غیر قابل‌اجتناب در افزایش راندمان این محصولات می‌باشد. اعمال کشاورزی دقیق نیازمند به‌کارگیری نیروی کارگری فراوان است. همچنین به علت خطرپذیر بودن اغلب عملیات‌های کشاورزی، انجام مستقیم آن توسط انسان توصیه نمی‌شود. به همین دلیل، خودکار نمودن عملیات‌های کشاورزی امری ضروری است. اولین گام در خودکار نمودن عملیات‌های کشاورزی، هدایت خودکار وسیله نقلیه می‌باشد. این امر در صورتی میسر می‌شود که وسیله نقلیه در یک محیط ناشناخته به شناسایی آن محیط پرداخته و در عین حال مکان خود را در این محیط پیدا کند. به عبارتی، باید قابلیت تهیه نقشه از محیط و در عین حال مکان‌یابی در این محیط را داشته باشد (li *et al.*, 2008). این مهم به‌وسیله مسئله مکان‌یابی و ایجاد نقشه هم‌زمان[5] (SLAM) قابل حل می‌باشد (Thrun *et al.*, 1998).

مسئله SLAM یک فرآیند تخمین بازگشتی بوده که با استفاده از آن می‌توان میزان خطا در نقشه و مکان‌یابی ربات را به حداقل رساند (Auta Cheein *et al.*, 2011). بر همین اساس الگوریتم‌های متنوعی جهت حل این مسئله گسترش پیدا کرده است که تنوع این الگوریتم‌ها به علت تنوع در به‌کارگیری حس‌گرهای مختلف، تنوع در نوع محیط و نوع نقشه تهیه شده از این محیط‌ها می‌باشد (Leonard and Durrant-Whyte, 1991; Montemerlo *et al.*, 2002; Eliazar, 2003; Estrada *et al.*, 2005; Eliazar and Parr, 2004).

اما در حالت کلی الگوریتم‌های SLAM به دو دسته برخط[6] و کامل[7] طبقه‌بندی می‌شوند (Thrun *et al.*, 1998). در روش SLAM برخط، مکان ربات ($x_t$) در هر گام ($t$) و نقشه محیط ($m$) با به‌کارگیری مشاهدات محیط ($z_{1:t}$) و داده‌های کنترلی ربات ($u_{1:t}$) از ابتدا حرکت تا گام t و با استفاده از تابع احتمال نشان داده شده در رابطه (۱) تخمین زده می‌شود (Thrun *et al.*, 2005):

$$p(x_t, m | z_{1:t}, u_{1:t}) \quad (۱)$$

فیلتر کالمن و فیلتر کالمن توسعه‌یافته از جمله الگوریتم‌هایی جهت حل مسئله SLAM برخط می‌باشند (Leonard and Durrant-Whyte, 1991). این فیلترها با استفاده از توزیع گوسی به تخمین موقعیت ربات و به‌روزرسانی نقشه می‌پردازند. از معایب این فیلترها پیچیدگی فرآیند به‌روزرسانی و عملیات خطی‌سازی برای فرآیندهای غیرخطی می‌باشند (Thrun *et al.*, 2005). جهت بر طرف کردن این معایب الگوریتم Fast SLAM بر مبنای فیلتر ذره‌ای

۱- دانشجوی دکتری، گروه مکانیک بیوسیستم، دانشکده مهندسی فناوری، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران
۲- استاد، گروه مکانیک بیوسیستم، دانشکده مهندسی فناوری، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران
۳- استاد، گروه مکانیک بیوسیستم، دانشکده مهندسی فناوری، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران
۴- دانشجوی سابق دکتری، گروه مکانیک بیوسیستم، دانشکده مهندسی فناوری، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران
(*- نویسنده مسئول: Email: Shahinrafiee@ut.ac.ir)
DOI: 10.22067/jam.v10i2.78256

5- Simultaneous Localization and Mapping

6- Online-SLAM
7- Full-SLAM

Rao-Blackwellized توسعه داده شد. در این الگوریتم از فیلتر ذره‌ای جهت تخمین مکان ربات و از فیلتر کالمن توسعه‌یافته جهت به‌روزرسانی نقشه محیط استفاده شده است (Montemerlo *et al.*, 2002).

بر خلاف SLAM برخط، SLAM کامل مسیر حرکت کلی ربات ($x_{1:t}$) را تخمین می‌زند. Graph-SLAM یکی از الگوریتم موجود جهت حل مسأله SLAM کامل می‌باشد. ساختار کلی Graph-SLAM به شکلی است که از یک گراف با گره‌ها و یال‌ها تشکیل شده که گره‌ها نمایان‌گر مکان ربات و یال‌ها محدودیت‌های اعمال شده بین مکان‌ها را نمایش می‌دهند (Grisetti *et al.*, 2010). ادومتری[۱] و لوپ کلوزر[۲] از جمله محدودیت‌هایی هستند که در یال‌ها به شکل ماتریس تبدیل (دوران و انتقال) و ماتریس کواریانس نمایان می‌شوند. الگوریتم Graph-SLAM با اعمال این محدودیت‌ها و با استفاده از یک بهینه‌کننده سراسری، مسیر حرکت کلی ربات و همچنین نقشه محیط را بهینه می‌کند (Pierzchała *et al.*, 2018).

در حل مسئله SLAM الگوریتم‌های متنوعی براساس نوع حس‌گر به‌کار رفته توسعه پیدا کرده‌اند. لیزر اسکنر رایج‌ترین حس‌گری است که در حل این مسئله استفاده می‌شود. از مهم‌ترین این الگوریتم‌ها که با استفاده از لیزر اسکنر توسعه پیدا کرده‌اند Hector mapping و Gmapping می‌باشند. Gmapping یک روش استاندارد بوده که بر پایه فیلتر ذره‌ای Rao-Blackwellised به مکان‌یابی و ایجاد نقشه هم‌زمان می‌پردازد. هدف از این روش کاهش تعداد ذره‌ها و در عین حال افزایش میزان دقت الگوریتم می‌باشد. این الگوریتم با استفاده از داده‌های قبلی لیزر اسکنر منجر به کاهش عدم قطعیت مکان‌یابی شده و در نهایت مکان دقیق ربات را در محیط برآورد می‌کند (Grisetti *et al.*, 2007; Grisetti *et al.*, 2005). Hector mapping یک روش بهینه‌شده برای راهروهای باریک و محیط‌های پیچیده می‌باشد. این الگوریتم نیازمند داده‌های اضافی براساس ادومتری[۳] نبوده و بدون این داده‌ها هم دارای دقت کافی می‌باشد. این الگوریتم برای تعریف مکان فعلی ربات از روش انطباق–اسکن و فیلتر نیوتن–گوسی براساس توزیع ذره‌ها استفاده می‌کند. همچنین این الگوریتم قابلیت تولید نقشه‌های چند لایه را دارد (Kohlbrecher *et al.*, 2013; Kohlbrecher *et al.*, 2011).

به‌کارگیری لیزر اسکنر دارای محدودیت‌هایی می‌باشد که از جمله می‌توان به دقت فضایی کم، زمان داده‌برداری زیاد و قیمت بالای آن اشاره کرد. حل مسئله SLAM با استفاده از حس‌گرهای بینایی[۴] (VSLAM) (تک دوربین، یک دوربین استریو و یا یک دوربین RGB-D) مشکلات موجود در رابطه با به‌کارگیری لیزر اسکنر را مرتفع نموده است. در VSLAM مکان‌یابی ربات با استفاده از شناخت ویژگی‌های محیط به‌دست می‌آید (Diebel *et al.*, 2004). به‌کارگیری تک دوربین به علت عدم تخمین موقعیت سه‌بعدی ویژگی‌های محیط دارای کمبود می‌باشد (Kim *et al.*, 2005). جهت حل این مشکل می‌توان از دوربین استریو استفاده نمود. بینایی استریو به معنای توانایی استخراج عمق براساس تحلیل دو تصویر گرفته شده از زوایای مختلف یک صحنه می‌باشد. مزیت اصلی بینایی استریو نسبت به بینایی یک چشمی معمولی توانایی آن در شناسایی فاصله بین اشیای واقعی و دوربین است. دوربین یک چشمی تصویر مسطحی ایجاد می‌کند که در آن هر پیکسل نتیجه افکنش دوبعدی جهان سه‌بعدی است. به عبارتی، سامانه استریو، یک جفت از تصاویر دیجیتالی را که به‌طور هم‌زمان به‌وسیله یک دوربین استریو به‌دست آمده‌اند به یکدیگر ارتباط داده و اشیای مشابه در هر دو تصویر را شناسایی کرده و تفاوت موقعیت آن‌ها را به‌صورت پیکسل اندازه‌گیری می‌کند. این تفاوت همراه با سایر پارامترها، سامانه را قادر به بازسازی صحنه واقعی یک تصویر مجازی سه‌بعدی می‌نماید (Mousazadeh and Javan bakht, 2015). رایج‌ترین الگوریتم SLAM که براساس حس‌گرهای بینایی سه‌بعدی توسعه پیدا کرده است، RTAB-Map می‌باشد. RTAB-Map یک روش گراف–مبنا بوده که قابلیت تشخیص لوپ کلوزر را دارا می‌باشد. به عبارت دیگر در این الگوریتم بعد از تشخیص لوپ‌کلوزر، محدودیت جدید به گراف اضافه شده و در نهایت نقشه تهیه شده با استفاده از یک بهینه‌کننده گراف اصلاح شده و خطاها موجود در آن را به حداقل می‌رساند. این الگوریتم قادر است تنها با استفاده از یک دوربین استریو نقشه‌ی جامعی از محیط تهیه کند.

در سال‌های اخیر استفاده از مسئله مکان‌یابی و ایجاد نقشه هم‌زمان جهت ناوبری خودکار در محیط‌های کشاورزی مورد توجه محققین قرار گرفته است. در سال ۲۰۱۱، الگوریتمی بر مبنای فیلتر اطلاعات توسعه‌یافته[۵] جهت ناوبری خودکار در باغ زیتون توسعه داده شد. جهت طراحی الگوریتم از اطلاعات یک دوربین و یک لیزر اسکنر استفاده شد. الگوریتم براساس تشخیص ساقه‌های زیتون در تصاویر گرفته شده با استفاده از الگوریتم ماشین بردار پشتیبان[۶] عمل می‌کرد. همچنین از یک روش بهینه‌کننده سراسری جهت کاهش خطاهای الگوریتم استفاده شد (Auta Cheein *et al.*, 2011). در پژوهشی دیگر، با استفاده از یک دوربین و لیزر اسکنر الگوریتمی جهت مکان‌یابی و ایجاد نقشه هم‌زمان ربات در محیط‌های کشاورزی طراحی شد. دامنه فرکانس و همبستگی برای الگوریتم طراحی شده

1- Odometry
2- Loop clouser
3- Odometry
4- Vision-based SLAM (V SLAM)

5- EIF-SLAM
6- Support Vector Machine (SVM)

استفاده شد. میزان جابه‌جایی ربات با اندازه‌گیری میزان جابه‌جایی و دوران دو گام متوالی محاسبه شد (Lepej and Rakun, 2016). در سال ۲۰۱۶، از الگوریتم مکان‌یابی و ایجاد نقشه همزمان در یک ربات تک چشمی جهت برداشت فلفل دلمه‌ای استفاده شد. جهت برآورد این هدف از الگوریتم LSD-SLAM استفاده شد که این الگوریتم با استفاده از یک دوربین به مکان‌یابی و ایجاد نقشه همزمان ربات می‌پرداخت (Barth *et al.*, 2016).

به دلیل محدود بودن پژوهش‌های انجام شده در زمینه مکان‌یابی و ایجاد نقشه همزمان در محیط‌های کشاورزی، هدف از این پژوهش، مکان‌یابی و ایجاد نقشه همزمان در محیط گلخانه با استفاده از بینایی استریو و در نتیجه ایجاد نقشه سه‌بعدی و دوبعدی از این محیط می‌باشد.

## مواد و روش‌ها

### سیستم تصویربرداری

سیستم تصویربرداری مورد استفاده در این پژوهش از قسمت‌های اصلی دوربین استریو، پایه دوربین و کامپیوتر تشکیل شده بود (شکل ۱). دوربین استریو توسعه داده شده به‌وسیله نصیری و همکاران جهت تصویربرداری استریو از گلخانه مورد استفاده قرار گرفت (Nasiri *et al.*, 2016). دوربین استریو شامل دوربین‌ها و قاب دوربین بود. دوربین‌های مورد استفاده در این سیستم شامل دو وب‌کم ساخت شرکت ماکروسافت[1] با رزلوشن تصویربرداری ۵۴۴×۹۶۰ پیکسل بودند که از طریق USB2 به کامپیوتر متصل می‌شدند.



**شکل ۱**– سیستم تصویربرداری توسعه داده شده

**Fig.1.** The image acquisition system

برای ساخت قاب دوربین استریو به‌طوری‌که امکان انتخاب خط‌مبنای متفاوت بین دو دوربین وجود داشته باشد، از یک شمش

1- Microsoft lifecam studio webcam

آلومینیومی به ابعاد ۳۰×۷×۵ سانتی‌متر استفاده نمودند. در طول شمش آلومینیومی متناسب با ابعاد دوربین، شیارهایی به فواصل ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ سانتی‌متر ایجاد شده بود. انتخاب خط‌مبنای مناسب یک فرآیند بهینه‌سازی بین دقت و انطباق می‌باشد به همین دلیل با آزمون و خطا فاصله دو دوربین ۱۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شد (Nasiri, 2017). جهت تصویربرداری استریو، دوربین استریو توسعه داده شده بر روی پایه دوربین با ارتفاع تقریبی ۷۵ سانتی‌متر قرار داده شده و به کامپیوتر متصل شد و جهت تهیه تصاویر، به داخل محیط گلخانه انتقال یافت.

### طراحی الگوریتم

در این تحقیق جهت مکان‌یابی و ایجاد نقشه همزمان از محیط گلخانه با استفاده از بینایی استریو، از چارچوب راس[2] در محیط اوبونتو[3] استفاده شد. راس شامل کتابخانه‌ها و ابزارهای مختلف از جمله بسته‌ها[4] و نرم‌افزارهای متن باز[5] جهت به‌کارگیری در زمینه‌های مختلف رباتیک می‌باشد (Lepej and Rakun, 2016). همچنین راس دارای ساختار شبکه‌ای بوده که باعث ارتباط بین قسمت‌های مختلف الگوریتم به‌وسیله گره‌ها[6] می‌شود. شکل ۲ طرح کلی الگوریتم طراحی شده، گره‌های به‌کار برده شده و نحوه ارتباط آن‌ها با یکدیگر را نمایش می‌دهد.

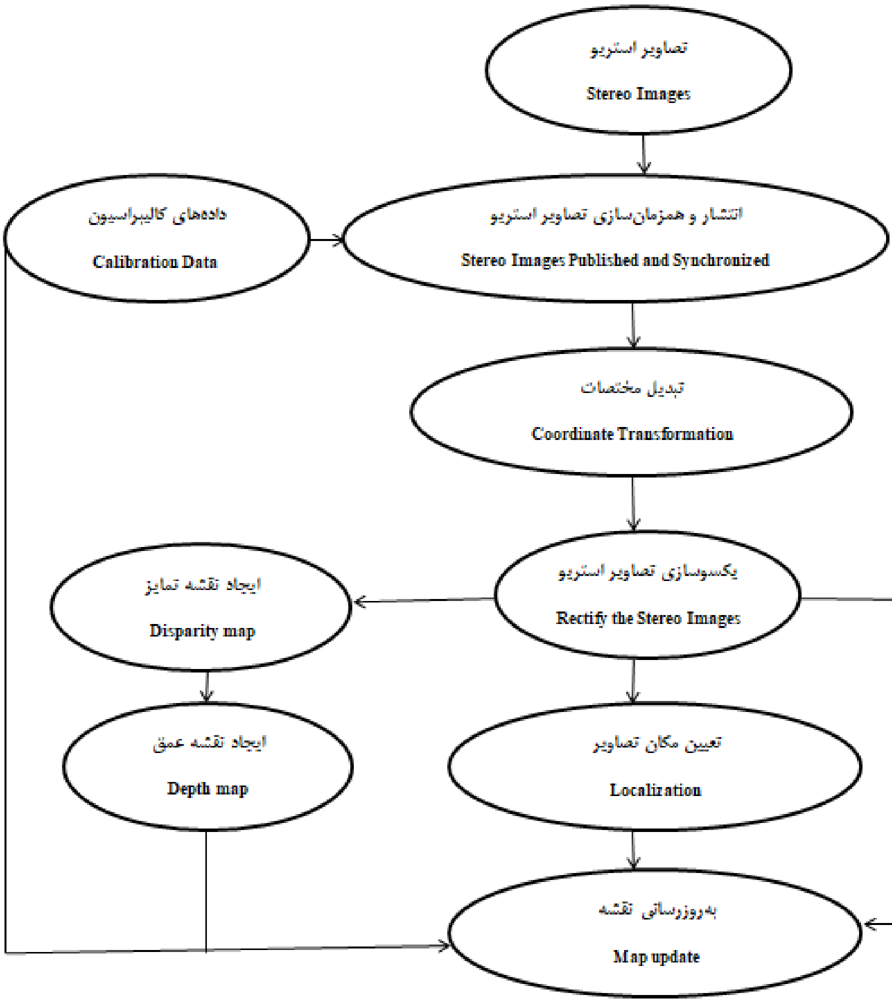
### کالیبراسیون دوربین

در مرحله اول قبل از اجرای الگوریتم، نیاز است که دوربین استریو کالیبره شود. دقت بازیابی سه‌بعدی در فرآیند بینایی استریو تحت تاثیر پارامترهای متعددی است که عمدتاً در طی فرآیند کالیبراسیون تعیین می‌گردند (Nasiri *et al.*, 2016). در این تحقیق از روش ارائه شده توسط ژنگ[7] برای کالیبراسیون دوربین‌ها استفاده شد. در این روش اغتشاشات ناشی از نقص لنز دوربین برای مدل دوربین در نظر گرفته می‌شود (Zhang, 1999).

سیستم تصویربرداری بعد از انتقال به گلخانه و قبل از تهیه تصاویر استریو از این محیط، کالیبره شد. برای این منظور از یک صفحه شطرنجی ۶×۷ با ابعاد ۳۳ میلی‌متر برای هر مربع به‌عنوان الگوی کالیبراسیون استفاده شد. تصویربرداری از الگو در فواصل و جهت‌های مختلف نسبت به دوربین انجام گرفت. در طی فرآیند کالیبراسیون محل تقاطع مربع‌های سیاه و سفید (گوشه‌ها) به‌عنوان نقاط کنترلی به کمک الگوریتم‌های گوشه‌یابی با دقت زیر پیکسل تعیین، سپس با تخمین مختصات سه‌بعدی نقاط انتخاب شده و حل دستگاه معادلات کالیبراسیون، پارامترهای داخلی، خارجی و ضرایب

2- Robot Operating System (ROS)
3- Ubuntu 14.04 LTS
4- Package
5- Open source software
6- Nodes
7- Zhang

اعوجاج استخراج شد (Zhang, 1999). برای ارزیابی دقت کالیبراسیون از خطای اپیپولار و پارامترهای خارجی استخراج شده از نتیجه کالیبراسیون، استفاده شد ( Camera-calibration_ros software package).




**شکل ۲**– طرح کلی الگوریتم طراحی شده

**Fig.2.** Design of the algorithm

## تصاویر استریو

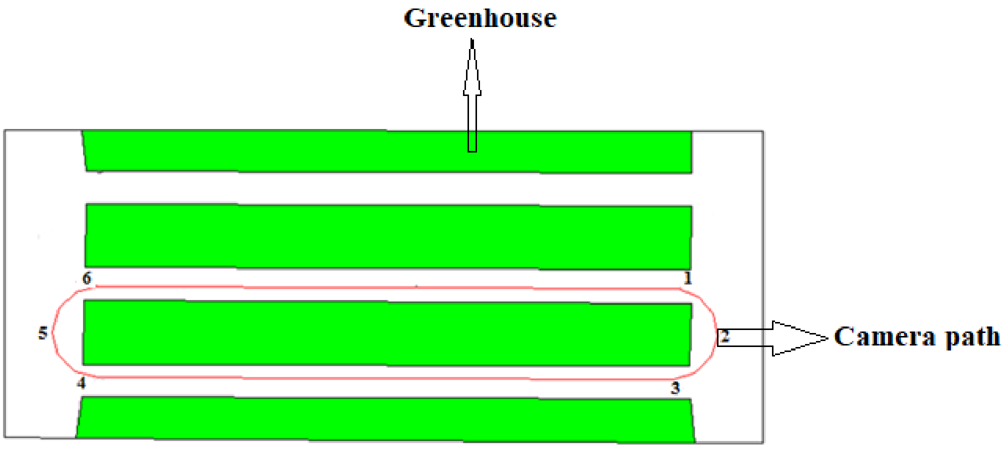
مکان‌یابی و ایجاد نقشه همزمان برای یک قسمت از گلخانه‌ای به ابعاد تقریبی ۶/۵×۱۹ متر و دارای ۴ بستر کشت مستطیلی واقع در شهر اراک انجام شد (شکل ۳). بسترهای کشت شامل قلمه‌های گونه‌های مختلف گل رز، شمشاد و همچنین دارای مکان‌های کشت نشده بودند که گلدان‌هایی در این مکان‌ها قرار داده شد.

قبل از ثبت تصاویر استریو در محیط گلخانه، مسیر حرکت دوربین در این محیط طراحی شد. برای این منظور یک مسیر در محیط گلخانه در نظر گرفته شد و نقاطی در این مسیر مشخص شد. با استفاده از دوربین نقشه برداری توتال استیشن مدل لایکا[1] و تعیین مختصات این نقاط، مسیر حرکت دوربین استریو طراحی شد. مسیر طراحی شده شامل مسیرهای مستقیم و منحنی بوده و طول تقریبی آن ۳۲/۷ متر بود. شکل ۴ نقشه شماتیک گلخانه و همچنین مسیر طراحی شده جهت حرکت دوربین استریو را با خطوط قرمز نمایش می‌دهد. در نهایت مسیر طراحی شده در گلخانه جهت حرکت دوربین استریو در مسیرهای مستقیم با گام ۱۰ سانتی‌متر و در مسیرهای منحنی با گام ۶ درجه پیاده‌سازی شد. بعد از فرآیند کالیبراسیون، سیستم تصویربرداری در مسیر طراحی شده در گلخانه در گام‌های مشخص به‌صورت دستی جابه‌جا شده و بعد از هر جابه‌جایی در حالی که پایه دوربین در موقعیت خود ثابت بود تصاویر استریو تهیه شدند.

1- Leica, TC-805



**شکل ۳**- گلخانه مورد پژوهش
**Fig.3.** Greenhouse research




**شکل ٤**- نقشه شماتیک کل گلخانه و مسیر طراحی شده جهت حرکت سیستم تصویربرداری در قسمت مشخص شده
**Fig.4.** Greenhouse schematic map and the path of the image acquisition system in the specific section

## انتشار و هم‌زمان‌سازی تصاویر استریو

جهت استفاده تصاویر به‌وسیله چارچوب راس نیاز است که تصاویر با فرمت مشخص شده در این چارچوب ارسال گردد. همچنین نیاز است که تصاویر راست و چپ گرفته شده به‌وسیله دوربین استریو بعد از انتشار هم‌زمان‌سازی شود. به همین منظور، گره‌ای جهت انتشار و هم‌زمان‌سازی تصاویر استریو در نظر گرفته شد. با استفاده از این گره می‌توان تصاویر استریو را با نرخ مشخصی به‌صورت هم‌زمان منتشر کرد. در این تحقیق، تصاویر استریو با نرخ ۱ هرتز انتشار و هم‌زمان‌سازی شدند.

## تبدیل مختصات

تصاویر استریو منتشر شده دارای مختصات دوربین می‌باشند. مختصات دوربین به صورتی است که محور X به سمت راست، محور Y به سمت پایین و محور Z به سمت جلو می‌باشد (Bradski and Kaeler, 2008). جهت ایجاد نقشه از محیط نیاز است که محور مختصات تصاویر منتشر شده به محور مختصات جهانی تبدیل شود به‌طوری‌که محور X به سمت جلو، محور Y به سمت چپ و محور Z به سمت بالا باشد. به همین منظور گره‌ای جهت تبدیل محورهای مختصات تصاویر استفاده می‌شود. این گره با در نظر گرفتن نقطه شروع حرکت دوربین سمت چپ به‌عنوان مبدأ مختصات جهانی، تبدیل مختصات جهانی تصاویر منتشر شده را انجام می‌دهد.

## یکسوسازی تصاویر استریو

جهت تعیین مکان تصاویر و تهیه نقشه از محیط نیاز است که تصاویر استریو یکسوسازی شود. در این تحقیق از روش ارائه شده توسط بوگت برای یکسوسازی تصاویر استفاده شده است. این الگوریتم از پارامترهای انتقال و دوران دو دوربین تنظیم شده برای یکسوسازی استفاده می‌کند (Bradski and Kaeler, 2008).

**تعیین مکان تصاویر**

تخمین میزان جابه‌جایی دوربین از جمله ملزومات هر سامانه دیداری متحرک به حساب می‌آید و در هر مرحله به دانستن موقعیت نسبی قاب کنونی دوربین نسبت به قاب پیشین یا قاب مرجع ثابت نیاز می‌باشد. در این تحقیق از مکان‌یابی دیداری جهت تعیین مکان دوربین استفاده شد. ایده اصلی در این روش، تخمین میزان حرکت از طریق دنبال کردن ویژگی‌های بصری مشخص در دنباله‌ای از تصاویر است (Milella *et al.*, 2009). به عبارتی می‌توان بیان کرد که هدف مکان‌یابی دیداری برآورد میزان رابطه دو تصویر متوالی و در نهایت ارتباط این رابطه با مبدأ مختصات مرجع می‌باشد. مکان‌یابی دیداری با استفاده از بینایی استریو شامل سه مرحله اصلی، استخراج و توصیف ویژگی‌های محیط، انطباق و ردیابی ویژگی‌ها در تصاویر استریو و تخمین میزان حرکت دوربین می‌باشد. روش‌های متنوعی جهت استخراج و توصیف نقاط ویژگی وجود دارد که در این تحقیق به علت پایین بودن نرخ انتشار تصاویر از روش ویژگی‌های مقاوم پر سرعت (سورف)[1] جهت استخراج و توصیف ویژگی‌های محیط استفاده شد (Bay *et al.*, 2008). همچنین به علت تصویربرداری از محیط گلخانه در شرایط نور طبیعی و تغییرات شرایط روشنایی محیط گلخانه، باید از روشی که نسبت به این تغییرات مقاوم بوده استفاده نمود. به همین علت، جهت تخمین میزان حرکت دوربین از ویژگی‌های مقاوم پر سرعت استفاده شد که مستقل از انتقال، چرخش و مقیاس هستند و تا حد امکان نسبت به تغییرات شدت روشنایی تصاویر در محیط گلخانه و نویز مقاوم می‌باشند. در مرحله بعد، انطباق تصاویر استریو با استفاده از روش تطبیق متقارن[2] انجام شد. در این روش از معیار نزدیک‌ترین همسایه[3] در دو جهت استفاده شده است (Langaniere, 2011). برای ردیابی ویژگی‌ها در تصاویر استریو متوالی نیز مشابه تطابق ویژگی‌های متناظر در جفت تصویر استریو از روش تعیین یک حد آستانه (در این تحقیق ۰/۸ انتخاب شده است) و نسبت نزدیکترین همسایه استفاده شد.

تخمین میزان حرکت (جابه‌جایی و دوران) دوربین استریو در دو مرحله تخمین میزان حرکت قاب به قاب تصاویر و تبدیل به مختصات جهانی انجام می‌شود. جهت تخمین میزان جابه‌جایی و دوران قاب به قاب تصاویر از روش 3D-2D استفاده شد (Longuet-Higgins, 1987; Nister *et al.*, 2004; Zhang, 1998). در این روش، موقعیت دوربین در قاب جدید براساس نقاط سه‌بعدی صحنه و ویژگی‌های دوبعدی ردیابی شده در تصویر جدید محاسبه می‌شود. مزیت این روش کاهش خطای بازافکنش می‌باشد که همین امر باعث افزایش دقت تخمین می‌شود (Nister, 2003). بعد از تخمین بردار جابه‌جایی و ماتریس دوران قاب به قاب، موقعیت قاب (دوربین) در لحظه جاری نسبت به مبدأ توسط رابطه (۲) تعیین می‌شود (Craig, 2005). در تحقیق جاری، نقطه شروع حرکت دوربین سمت چپ به‌عنوان مبدأ جهانی در نظر گرفته شده است.

$$ {}^{t}_{0}frame = {}^{t-1}_{0}frame \times {}^{t}_{t-1}frame $$
$$ {}^{t}_{t-1}frame = \begin{bmatrix} R_{3\times3} & T_{3\times3} \\ 0 & 1 \end{bmatrix}_{4\times4} \quad (۲)$$

در رابطه (۲)، ${}^{t}_{0}frame$، موقعیت دوربین در لحظه جاری نسبت به مبدأ جهانی مختصات، T بردار جابه‌جایی و R ماتریس دوران فریم در لحظه t نسبت به فریم در لحظه t-1 می‌باشند که از تخمین میزان حرکت قاب به قاب تصاویر به‌دست آمده است.

**به‌روزرسانی نقشه**

با استفاده از الگوریتم SLAM نقشه محلی محیط در هر گام به‌دست آمده و با داشتن مکان تصاویر در هر گام، نقشه محیط به‌روزرسانی می‌شود. در این تحقیق از الگوریتم RTAB-Map جهت تحقق این عمل استفاده شده است (Labbé and Michaud, 2011; Labbé and Michaud, 2013; Labbé and Michaud, 2014).

تولید نقشه محلی با استفاده از الگوریتم RTAB-Map و دست‌یابی به مختصات نقاط محیط و به‌دست آوردن مدل سه‌بعدی آن، با استفاده از انطباق تصاویر راست و چپ، به‌دست آوردن تصویر ناهم‌خوانی (نقشه تمایز[4]) و در نهایت بازیابی مدل سه‌بعدی محیط از این نقشه انجام می‌شود. روش‌های مختلفی برای انجام مرحله انطباق در این الگوریتم پیشنهاد می‌شود. در این تحقیق از الگوریتم تطابق بلوکی[5] استفاده شد. از ویژگی‌های منحصر به فرد این روش سرعت بالای آن در انطباق تصاویر و استخراج مدل سه‌بعدی می‌باشد (Bradski and Kaeler, 2008). با در اختیار داشتن نقشه تمایز و اطلاعات مربوط به دوربین‌ها و هندسه سامانه تصویربرداری، مختصات سه‌بعدی اجزای محیط با استفاده از روش مثلثاتی تعیین می‌شود (Cyganek and Siebert, 2009).

در نهایت با در اختیار داشتن مکان تصویر در هر گام و همچنین نقشه محلی، با استفاده از الگوریتم RTAB-Map دو نوع نقشه‌ی سه‌بعدی متراکم[6] و شبکه اشغال[7] از محیط گلخانه استخراج شد. نقشه سه‌بعدی متراکم یک نقشه نقاط ابری[8] از محیط بوده که شامل اطلاعات مختصات سه‌بعدی نقاط محیط و سایر ویژگی‌های این نقاط از جمله ویژگی رنگی (RGB) آن‌ها می‌باشد (Audras *et al.*, 2011). در نقشه‌های شبکه اشغال، محیط توسط یک شبکه گسسته

1- Speeded-Up Robust Features (SURF)
2- Symmetrical matching scheme
3- K-nearest neighbor

4- Disparity map
5- Block matching
6- Dense 3D map
7- Occupancy Grid maps
8- Point cloud

نمایش داده می‌شود که در آن هر سلول (یا پیکسل در تصویر)، توسط یک مانع اشغال شده و یا این‌که خالی بوده و فضای آزاد به حساب می‌آید (Borenstein and Koren, 1991; Elfes, 1990). از مهم‌ترین امتیازات این نوع نقشه استفاده آن در طراحی مسیر و اکتشاف محیط می‌باشد که اطلاعات احتمالاتی مربوط به سلول‌ها، پیچیدگی طراحی مسیر را کاهش می‌دهد.

همان‌طور که در بخش مقدمه ذکر شد، الگوریتم RTAB-Map یک روش گراف-مبنا بوده که جهت کاهش خطای مکان‌یابی و نقشه نیازمند تشخیص لوپ‌کلوزر می‌باشد. به همین دلیل مسیر طراحی شده در محیط گلخانه، یک مسیر بسته در نظر گرفته شده است تا در انتهایی مسیر لوپ‌کلوزر مورد نظر ایجاد شود (شکل ۴). جهت بهینه‌کردن گراف و کاهش خطاهای مکان‌یابی و نقشه، از روش تارو[1] (TORO) استفاده شد. این روش که براساس الگوریتم اولسان[2] توسعه پیدا کرده است با به‌کارگیری یک پارامتر درختی از گره‌ها در گراف باعث بهبود کافی در عملکرد ربات شده و آن را قادر به پیروی از توپولوژی‌های شبکه‌های نامنظم می‌نماید (Grisetti *et al.*, 2007).

به منظور ایجاد نقشه از محیط گلخانه، تصاویر استریو با گام‌های ۳۰ سانتی‌متر برای مسیرهای مستقیم و ۶ درجه برای مسیرهای منحنی ثبت شد. برای محاسبه خطا در تخمین موقعیت دوربین، مکان‌های دوربین استریو که در هر گام به‌صورت دستی اندازه‌گیری شده بود با مکان‌های تخمین زده شده توسط الگوریتم با محاسبه فاصله اقلیدسی مقایسه شد (Nasiri *et al.*, 2016; Shalal *et al.*, 2015; Nasiri, 2017). با توجه به ثابت بودن ارتفاع دوربین استریو، خطای مکان‌ها با محاسبه فاصله اقلیدسی ($D_E$) بین نقاط تخمین زده شده ($X_m$, $Y_m$) و نقاط واقعی ($X_a$, $Y_a$) با استفاده از رابطه (۳) محاسبه شد (Shalal *et al.*, 2015):

$$D_E = \sqrt{(x_a - x_m)^2 + (Y_a - Y_m)^2} \quad (۳)$$

همچنین میزان خطای دوران دوربین استریو حول سه محور X، Y و Z با محاسبه میزان انحراف بین دوران‌های واقعی و دوران‌های تخمین زده شده به‌وسیله الگوریتم طراحی شده محاسبه شد (Nasiri, 2017).

## نتایج و بحث

نتیجه حاصل از دقت فرآیند کالیبراسیون در شکل ۵ نمایش داده شده است. ستون سمت راست شکل ۵ دقت اندازه‌گیری را نمایش می‌دهد. به عبارتی، میزان خطای اپیپولار مهم‌ترین شاخص جهت تشخیص یک فرآیند کالیبراسیون موفق می‌باشد. با توجه به شکل ۵، میزان خطای اپیپولار در سمت راست تصویر نمایش داده شده که برابر ۰/۱۵ پیکسل می‌باشد. خطای اپیپولار زیر ۰/۲۵ پیکسل نشان‌دهنده دقت بالای نتیجه کالیبراسیون است (Camera-calibration_ros software package). همچنین نتایج حاصل از فرآیند کالیبراسیون در جدول ۱ ارائه شده است. این نتایج پارامترهای داخلی و خارجی دوربین استریو را دربرمی‌گیرند. با توجه به جدول ۱، ماتریس دوربین در برگیرنده پارامترهای داخلی دوربین که شامل فاصله کانونی، نقطه اساسی هستند، می‌باشد. دوربین‌های استفاده شده در بینایی استریو باید دارای فاصله کانونی و نقطه اساسی یکسانی باشند (Bradski and Kaeler, 2008). با توجه به جدول ۱، مقادیر فاصله کانونی دوربین‌ها، (۷۱۸/۹، ۷۲۳/۱۷) برای دوربین سمت چپ و (۷۱۵/۹۲، ۷۱۹/۴۲) برای دوربین سمت راست، و همچنین مقادیر نقطه اساسی، (۳۰۰/۹۷، ۴۸۸/۷۴) برای دوربین سمت چپ و (۲۹۲/۲۸، ۴۹۰/۵۶) برای دوربین سمت راست می‌باشند. با توجه به نزدیکی این مقادیر به یکدیگر، نتیجه می‌شود که دوربین‌های انتخاب شده برای توسعه دوربین استریو مناسب می‌باشند.

ماتریس اعوجاج، اعوجاج‌های شعاعی و مماسی دوربین را در برمی‌گیرد (Bradski and Kaeler, 2008). طبق جدول ۱، اعوجاج شعاعی دارای مقادیر ۰/۰۰۱۰۹۶، ۰/۰۰۷۹۵۹- و ۰ برای دوربین سمت چپ و ۰/۰۰۵۴۲۰، ۰/۰۳۸۲۲۶- و۰ برای دوربین سمت راست می‌باشد. همچنین اعوجاج مماسی دارای مقادیر ۰/۰۰۸۲۶۹ و ۰/۰۰۳۷۷۹ برای دوربین سمت چپ و ۰/۰۰۶۰۶۵ و ۰/۰۰۰۵۲۷ برای دوربین سمت راست می‌باشد.

پارامترهای خارجی که شامل ماتریس دوران تصویر دوربین سمت راست نسبت به تصویر دوربین سمت چپ می‌باشند در ماتریس یکسوسازی نمایش داده شده است. به‌عبارتی، ماتریس یکسوسازی میزان دوران‌های لازم در راستای محورهای X، Y و Z، جهت هم‌صفحه شده تصاویر چپ و راست می‌باشند (Bradski and Kaeler, 2008).

ماتریس افکنش که دربرگیرنده پارامترهای داخلی و خارجی دوربین می‌باشد، میزان جابه‌جایی دوربین سمت راست نسبت به دوربین سمت چپ را نمایش می‌دهد (Bradski and Kaeler, 2008). با توجه به این‌که خط‌مبنای دو دوربین در این تحقیق ۱۰ سانتی‌متر می‌باشد، بردار جابه‌جایی باید برای دوربین سمت راست میزان تقریبی ۱۰ سانتی‌متر در راستای محور X و مقدار صفر در راستای محورهای Y و Z را داشته باشد و همچنین برای دوربین چپ مقدار صفر در راستای سه محور مختصات را نشان دهد. طبق جدول ۱، میزان جابه‌جایی برای دوربین سمت چپ در راستای محورهای X، Y و Z را صفر و برای دوربین سمت راست در راستای محور X مقدار تقریبی ۹/۷۵ و برای محورهای Y و Z مقدار صفر را دربردارد که این نشان‌دهنده دقت کالیبراسیون می‌باشد (Camera-calibration_ros software package).

---
1- Tree-based network Optimizer
2- Olson




**شکل ۵**- نتیجه کالیبراسیون دوربین استریو
**Fig. 5.** Result of stereo camera calibration

**جدول ۱**- نتایج کالیبراسیون دوربین استریو
**Table 1-** Result of the stereo camera calibration

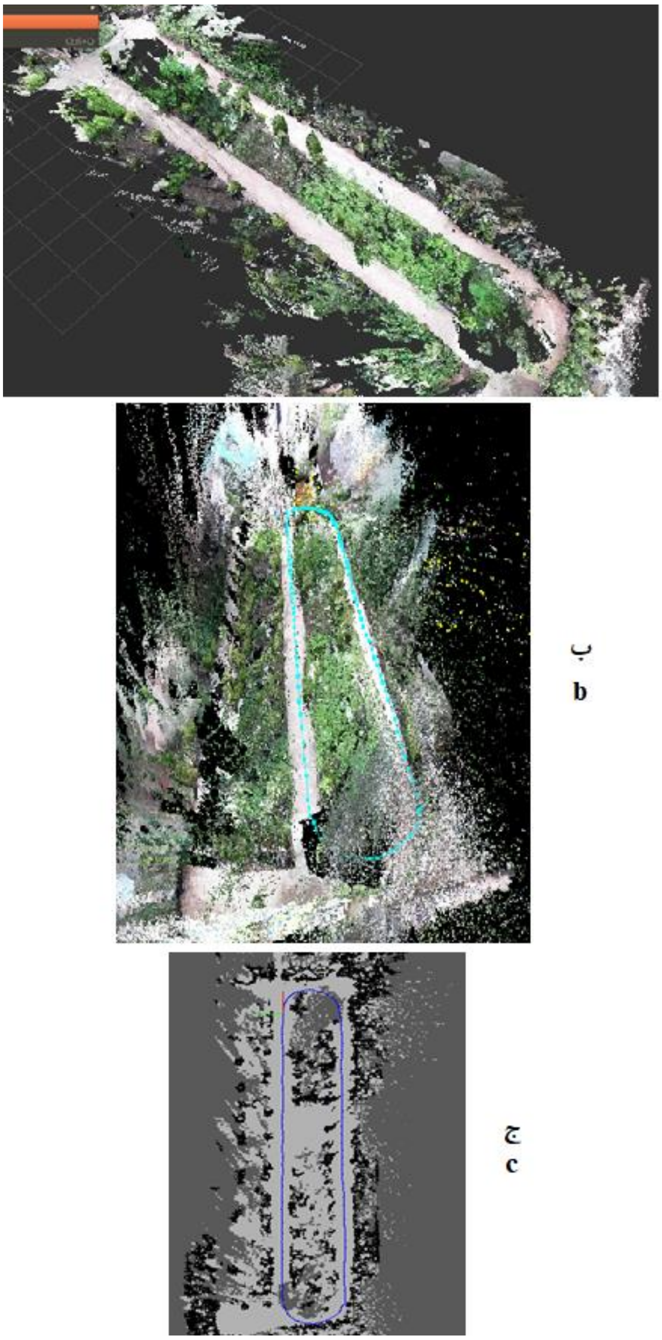
| | دوربین چپ<br>**Left camera** | دوربین راست<br>**Right camera** |
|---|---|---|
| ماتریس-دوربین<br>Camera_matrix | [723.174020, 0, 488.740816, 0, 718.920051, 300.977549, 0, 0, 1] | [719.429436, 0, 490.562927, 0, 715.922235, 292.287665, 0, 0, 1] |
| ماتریس- اعوجاج<br>Distortion_coefficients | [0.001096, -0.007959, 0.008296, 0.003779, 0.000000] | [0.005420, -0.038226, 0.006065, 0.000527, 0.000000] |
| ماتریس-یکسوسازی<br>Rectification_matrix | [0.999944, -0.010030, 0.003299, 0.010017, 0.999943, 0.003811, -0.003337, -0.003778, 0.999987] | [0.999948, -0.009683, -0.003222, 0.009671, 0.999946, -0.003810, 0.003259, 0.003779, 0.999988] |
| ماتریس-افکنش<br>Projection_matrix | [733.239376, 0, 491.911057, 0.000000, 0, 733.239376, 301.681948, 0, 0, 0, 1, 0] | [733.239376, 0, 491.911057, -70.163608, 0, 733.239376, 301.681948, 0, 0, 0, 1, 0] |

تعداد تصاویر گرفته شده از محیط گلخانه ۱۵۰ جفت تصویر و مسافت طی شده تقریبی ۳۲/۷ متر می‌باشد. نقشه سه‌بعدی ایجاد شده با استفاده از تصاویر استریو تهیه شده، نقشه سه‌بعدی همراه با مسیر تخمین زده شده حرکت دوربین (ترسیم شده با گراف آبی) و همچنین نقشه شبکه اشغال ایجاد شده برای این تصاویر در شکل ۶ نمایش داده شده است. با توجه به شکل (۶-ج)، رنگ سیاه نشان‌دهنده موانع (گلدان‌ها و گیاهان کشت شده در بستر کشت)، رنگ خاکستری روشن نشان‌دهنده مکان‌های شناخته شده، رنگ خاکستری تیره نشان‌دهنده مکان‌های ناشناخته و خطوط آبی مسیر تخمین زده شده دوربین استریو می‌باشند.

شکل ۷ مکان‌های واقعی و تخمین زده شده دوربین استریو را نمایش می‌دهد. همچنین جدول ۲ میزان خطای مکان‌یابی دوربین استریو را ارائه می‌دهد. با توجه به جدول ۲، میانگین خطای مکان‌یابی دوربین در مسافت ۳۲/۷ متر، ۰/۰۶۷۹۴۱۲ متر، انحراف معیار ۰/۰۴۵۶۴۳۱ متر و ریشه میانگین مربع خطای ۰/۰۰۷۵۵۶۹ متر می‌باشند. همچنین در جدول ۳ میزان خطای دوران دوربین استریو ارائه داده شده است. با توجه به جدول ۳، میزان خطای دوران دوربین استریو حول محور X، محور Y و محور Z به‌ترتیب دارای مقادیر ۰/۰۲۶۳۸۷-، ۰/۲۷۷۲۷۱ و ۰/۰۲۶۳۸۷ بوده که می‌تواند در اثر خطای انسانی و یا تراز نبودن مسیرهای حرکت در محیط گلخانه رخ داده باشند (Nasiri, 2017). در پژوهشی با به‌کارگیری دوربین استریو، میانگین درصد خطا برای مسافت طی شده به مقدار تقریبی ۰/۱۵ متر و میزان دوران در محدوده {۵ ۵-} درجه، ۰/۰۱۲۵ متر و ۰/۸۷۷۳ درجه به‌ترتیب برای جابه‌جایی و دوران حاصل شد (Yu *et al.*, 2008). در مقایسه با پژوهش ذکر شده، الگوریتم طراحی شده با در نظر گرفتن مسافت پیموده شده ۳۲/۷ متری دارای دقت مطلوبی می‌باشد.

مکان‌یابی و ایجاد نقشه هم‌زمان در محیط‌های کشاورزی، خصوصاً در گلخانه، زمینه تحقیقاتی نسبتاً جدیدی است که توسط محققین مورد توجه قرار گرفته است. در این تحقیق با استفاده از یک دوربین استریو، به مکان‌یابی و ایجاد نقشه هم‌زمان (SLAM) در محیط گلخانه پرداخته شد حال آن‌که محققان دیگر از حس‌گرهای ترکیبی جهت برآورد این هدف استفاده نموده‌اند (Auat Cheein *et al.*, 2011; Lepej and Rakun, 2016). در پژوهشی با استفاده از یک دوربین و لیزر اسکنر، مکان‌یابی و ایجاد نقشه هم‌زمان در محیط کشاورزی در مسیر پیموده شده ۱۹۲ متری دارای میانگین خطای ۰/۴۵ متر بود (Lepej and Rakun, 2016). نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد که استفاده از دوربین استریو نتایج بهتری را نسبت به

حسگرهای ترکیبی به‌دست می‌آورد. همچنین استفاده از دوربین استریو نسبت به سایر حس‌گرها، نمایش دقیق‌تری از واقعیت محیط ایجاد می‌کند (Bhatti, 2011). با استفاده از این مزیت می‌توان به اطلاعاتی از قبیل پیگیری توسعه پوشش‌های گیاهی، اندازه‌گیری پارامترهای مهم فیزیکی محصول از قبیل اندازه و حجم و اطلاعات رشد آن دست یافت (Rovira-Mas *et al.*, 2008). همچنین یکی از مزیت‌های این الگوریتم تشخیص لوپ‌کلوزر می‌باشد. لوپ‌کلوزر مسیرهای تکراری حرکت را مشخص کرده که با استفاده از این ویژگی می‌توان به کاهش تعداد عملیات مزرعه، افزایش بازده، به حداقل رساندن فشردگی و در نتیجه افزایش سود و بازدهی دست یافت (Nasiri, 2017).



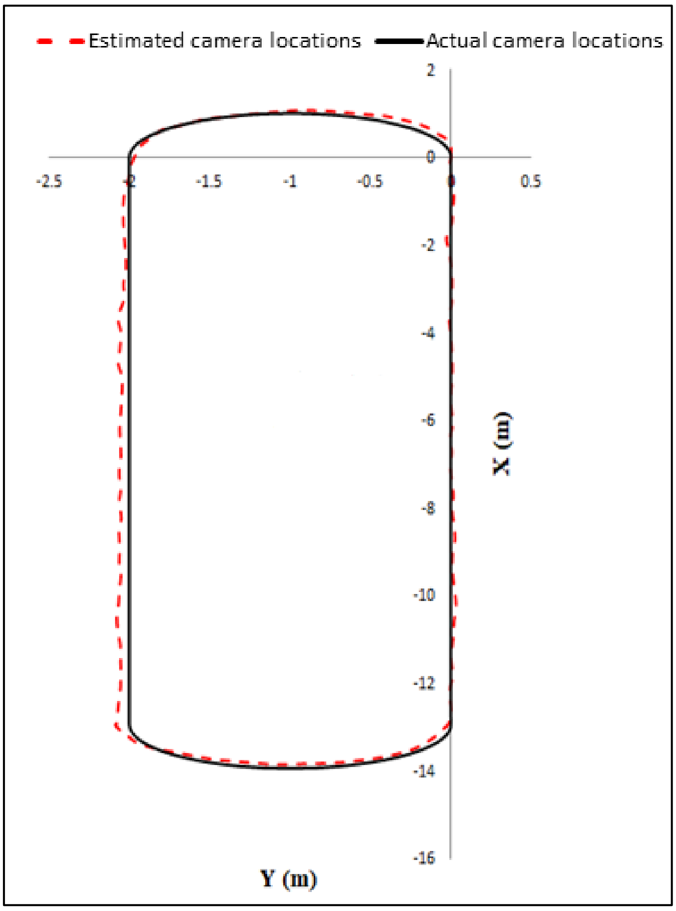
الف a

ب b

ج c

**شکل ٦**– الف) نقشه سه‌بعدی، ب) نقشه سه‌بعدی همراه با مسیر تخمین زده شده دوربین و ج) نقشه دوبعدی محیط گلخانه

**Fig.6**. a) 3D map, b) 3D map with estimated camera path and c) 2D map of greenhouse




**شکل ۷**– مکان‌های واقعی و تخمین زده شده دوربین استریو
**Fig.7.** Actual and estimated camera locations

**جدول ۲**– مقادیر خطا در تخمین مکان دوربین استریو
**Table 2-** Error values to estimate the position of the stereo camera

| طول مسیر<br>Length of path (m) | خطای کمینه<br>Min error (m) | خطای بیشینه<br>Max error (m) | میانگین خطا<br>Mean error (m) | انحراف معیار استاندارد<br>Standard deviation(m) | ریشه میانگین مربع خطا<br>RMSE (m) |
|---|---|---|---|---|---|
| 32.7 | 0.0071809 | 0.221712 | 0.0679412 | 0.0456431 | 0.0075569 |

**جدول ۳**– مقادیر میانگین خطا در تخمین دوران دوربین استریو
**Table 3-** Average error values in the estimation of stereo camera rotation angles

| چرخش در راستای Z<br>Rotate in the Z direction (rad) | چرخش در راستای Y<br>Rotate in the Y direction (rad) | چرخش در راستای X<br>Rotate in the X direction (rad) |
|---|---|---|
| 0.026387 | 0.277271 | 0.026387 |

## نتیجه‌گیری

به علت خطرپذیر بودن بسیاری از عملیات‌های کشاورزی، خودکار نمودن آن‌ها غیر قابل‌اجتناب است. مکان‌یابی و ایجاد نقشه همزمان (SLAM) گامی ضروری در خودکار کردن عملیات‌های کشاورزی می‌باشد. روش ارائه شده در این تحقیق جهت مکان‌یابی و ایجاد نقشه همزمان در محیط گلخانه، بر مبنای استفاده از مختصات سه‌بعدی اجزای محیط، که از سامانه بینایی استریو به‌دست می‌آیند، استوار است. جهت برآورد این هدف از چارچوب راس استفاده شد. جهت

برآورد دقت الگوریتم، فاصله اقلیدسی بین مکان‌های تخمین زده شده به‌وسیله الگوریتم و نقاط واقعی محاسبه شد. نتایج حاصل از این تحقیق نشان داد که الگوریتم معرفی شده دارای میانگین خطای ۰/۰۶۷۹۴۱۲ متر، انحراف معیار ۰/۰۴۵۶۴۳۱ متر و ریشه میانگین مربع خطای ۰/۰۰۷۵۵۶۹ متر برای مسافت ۳۲/۷ متری پیموده شده توسط دوربین استریو می‌باشد.

## References


1. Audras, C., A. Comport, M. Meilland, and P. Rives. 2011. Real-time dense appearance-based slam for rgb-d sensors. In: Australasian Conf. on Robotics and Automation.
2. Auta Cheein, F. A., G. Steiner, G. P. Paina, and R. Carelli. 2011. Optimized EIF-SLAM algorithm for precision agriculture mapping based on stems detection. Computers and Electronics in Agriculture 78: 195-207.
3. Barth, R., J. Hemming, and E. J. V. Henten. 2016. Design of an eye-in-hand sensing and servo control framework for harvesting robotics in dense vegetation. Biosystems Engineering 146: 71-84.
4. Bay, H., A. Ess, T. Tuytelaars, and L. Van Gool. 2008. Speeded-up robust features (SURF). Computer Vision and Image Understanding 110: 346-359.
5. Bhatti, A. 2011. Global 3D Terrain Maps for Agricultural Applications. Pages 227-242 in Rovira-Más F, ed. Advances in theory and applications of stereo vision. InTech. Croatia.
6. Borenstein, J., and Y. Koren. 1991. The vector field histogram-fast obstacle avoidance for mobile robots. IEEE Transactions on Robotics and Automation 7 (3): 278-288.
7. Bradski, G., and A. Kaehler. 2008. Learning OpenCV: Computer vision with the OpenCV library. O'Reilly Media, Inc. Sebastopol, CA.
8. Craig, J. J. 2005. Introduction to robotics: mechanics and control. Pearson Prentice Hall. Upper Saddle River, New Jersey, USA.
9. Cyganek, B., and J. P. Siebert. 2009. An Introduction to 3D Computer Vision Techniques and Algorithms. John Wiley & Sons, Ltd. United Kingdom.
10. Diebel, J., K. Reutersward, S. Thrun, J. Davis, and R. Gupta. 2004. Simultaneous Localization and Mapping with Active Stereo Vision. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems pp: 3437-3443.
11. Elfes, A. 1990. Occupancy grids: Astochastic spatial representation for active robot perception. In: Proceedings of the Sixth Conference on Uncertainty in AI.
12. Eliazar, A. 2003. DP-SLAM: Fast, robust simultaneous localization and mapping without predetermined landmarks. International Joint Conference on Artificial Intelligence.
13. Eliazar, A. I., and R. Parr. 2004. DP-SLAM 2.0. Robotics and Automation. Proceedings. ICRA ’04. 2004 IEEE International Conference.
14. Estrada, C., J. Neira, and J. D. Tardos. 2005. Hierarchical SLAM: Real-Time Accurate Mapping of Large Environments. Robotics, IEEE Transactionson 21 (4): 588-596.
15. Grisetti, G., C. Stachniss, and W. Burgard. 2005. Improving grid based SLAM with Rao blackwellized particle filters by adaptive proposals and selective resampling. In Proceedings of the IEEE international conference on robotics and automation pp: 2432-2437.
16. Grisetti, G., C. Stachniss, and W. Burgard. 2007. Improved techniques for grid mapping with rao-blackwellized particle filters. IEEE Transactions in Robotics 23: 34-46.
17. Grisetti, G., R. Kuemerle, C. Stachniss, and W. Burgard. 2010. A tutorial on graph-based SLAM. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems 2: 31-43.
18. Kim, G. H., J. S. Kim, and K. S. Hong. 2005. Vision-based Simultaneous Localization and Mapping with Two Cameras. IEEE/RSJ international Conference on Intelligent Robots and Systems.
19. Kitt, B., A. Geiger, and H. Lategahn. 2010. Visual odometry based on stereo image sequences with RANSAC-based outlier rejection scheme. In Intelligent Vehicles Symposium. University of California, San Diego, CA, USA.
20. Kohlbrecher, S., J. Meyer, O. von Stryk, and U. Klingauf. 2011. A flexible and scalable SLAM system with full 3D motion estimation. In Proceedings of the 2011 IEEE international symposium on safety, security and rescue robotics. Japan, pp: 155-160.
21. Kohlbrecher, S., J. Meyer, T. Graber, K. Petersen, U. Klingauf, and O. Stryk. 2013. Hector open source modules for autonomous mapping and navigation with rescue robots. TU Darmstadt, Germany, Department of Computer Science.
22. Labbé, M., and F. Michau. 2014. Online Global Loop Closure Detection for Large-Scale Multi-Session Graph-Based SLAM. in IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems.
23. Labbé, M., and F. Michaud. 2011. Memory management for real-time appearance-based loop closure detection. in IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems.
24. Labbé, M., and F. Michaud. 2013. Appearance-Based Loop Closure Detection for Online Large-Scale and Long-Term Operation. IEEE Transactions on Robotics 29: 734-745.
25. Langaniere, R. 2011. OpenCV 2 Computer Vision Application Programming Cookbook.

26. Leonard, J., and H. Durrant-Whyte. 1991. Mobile robot localization by tracking geometric beacons. IEEE Transactions on Robotics and Automation 7: 376-382.
27. Lepej, P., and J. Rakun. 2016. Localization and mapping in a complex field environment. Biosystems engineering 150: 160-169.
28. Li, M. H., B. R. Hong, Z. S. Cai, S. H. Piao, and Q. C. Huang. 2008. Novel indoor mobile robot navigation using monocular vision. Engineering Applications of Artificial Intelligence 21: 485-497.
29. Longuet-Higgins, H. 1987. A computer algorithm for reconstructing a scene from two projections. Readings in Computer Vision: Issues, Problems, Principles, and Paradigms, MA Fischler and O. Firschein, eds pp: 61-62.
30. Milella, A., B. Nardelli, D. Di Paola, and G. Cicirelli. 2009. Robust Feature Detection and Matching for Vehicle Localization in Uncharted Environments. In Proceedings of the IEEE/RSJ IROS Workshop Planning, Perception and Navigation for Intelligent Vehicles. Saint Louis, USA.
31. Montemerlo, M., S. Thrun, D. Koller, and B. Wegbreit. 2002. FastSLAM: a factored solution to the simultaneous localization and mapping problem. In AAAI National Conference on Artificial Intelligence
32. Mousazadeh, H. and S. Javan bakht. 2015**.** Mechatronics and Intelligent Systems for Off-road Vehicles. University of Tehran (1th ed.). (In Farsi).
33. Nasiri, A. 2017. Creation of pathway map in a greenhouse environment using localization of cultivation platform based on stereo machine vision. Ph. D. dissertation. University of Tehran. (In Farsi).
34. Nasiri, A., H. Mobli, S. Hosseinpour, and Sh. Rafiee. 2016. Creation greenhouse environment map using localization of edge of cultivation platforms based on stereo vision. Journal of Agricultural Machinery 7 (2): 336-349. (In Farsi).
35. Nister, D. 2003. An efficient solution to the five-point relative pose problem. In IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition 2: II-195.
36. Nister, D., O. Naroditsky, and J. Bergen. 2004. Visual odometry. In: Proceedings of the 2004 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition 1: I-652.
37. Pierzchała, M., P. Giguère, and R. Astrupa. 2018. Mapping forests using an unmanned ground vehicle with 3D LiDAR and graph-SLAM. Computers and Electronics in Agriculture 145: 217-225.
38. ROS camera_calibration_ros software stack. Retrieved from: http://wiki.ros.org/ camera_calibration_ros.
39. Rovira-Más, F., Q. Zhang, and J. F. Reid. 2008. Stereo vision three-dimensional terrain maps for precision agriculture. Computers and Electronics in Agriculture 60: 133-143.
40. Shalal, N., T. Low, Ch. McCarthy, and N. Hancock. 2015. Orchard mapping and mobile robot localization using on-board camera and laser scanner data fusion – Part B: Mapping and localization. Computers and Electronics in Agriculture xxx: xxx–xxx.
41. Thrun, S., W. Burgard, and D. Fox. 1998. A probabilistic approach to concurrent mapping and localization for mobile robots. Autonomous Robots 3: 18.
42. Thrun, S., W. Burgard, and D. Fox. 2005. Probabilistic robotics. Cambridge, USA: The MIT Press.
43. Vázquez-Arellano, M., D. Reiser, D. S. Paraforos, M. Garrido-Izard, Me. C. Burce, and H. W. Griepentrog. 2018. 3-D reconstruction of maize plants using a time-of-flight camera. Computers and Electronics in Agriculture 145: 235-247.
44. Zhang, Z. 1998.A flexible new technique for camera calibration. Available at: http://citeseer. IST. Psu. Edu/316762. Html.
45. Zhang, Z. 1999. Flexible camera calibration by viewing a plane from unknown orientations. In Computer Vision. The Proceedings of the Seventh IEEE International Conference on. Kerkyra, Greece.

Journal of Agricultural Machinery
Vol. 10, No. 2, Fall- Winter 2020, p. 141-153

نشریه ماشین‌های کشاورزی
جلد ۱۰، شماره ۲، نیمسال دوم ۱۳۹۹، ص ۱۵۳-۱۴۱

# Simultaneous Localization and Mapping in Greenhouse with Stereo Vision

**Z. Khosrobeygi[1], Sh. Rafiee[2*], S. S. Mohtasebi[3], A. Nasiri[4]**

Received: 03-01-2019
Accepted: 06-03-2019

**Introduction**

Increasing the production efficiency is an important goal in precision farming. The use of precision farming requires a lot of labor work. Also, due to the risk of agricultural operations, it is not recommended to do it directly by humans. Therefore, it is necessary for agricultural operations to be carried out automatically. For this reason, the application of robotics in agricultural environments, especially in the greenhouse, is increasing. The first step in automatic farming is autonomous navigation. For autonomous navigation, a robot must be the ability to understand its environment and recognize its position. In other words, a robot must be able to create a map of an unknown environment, locate itself on this map and finally plane for the path. This problem is solvable by Simultaneous Localization and Mapping (SLAM). The SLAM problem is a recursive estimation process. In the other words, when a robot moves in an unknown environment, mapping and localization errors increase incrementally. To reduce these two errors, a recursive estimation process is used to solve the SLAM problem.

**Materials and Methods**

In this research, two webcams, made by Microsoft Corporation with the resolution of 960×544, are connected to the computer via USB2 in order to produce a stereo parallel camera. For this study, we used a greenhouse that was located the Arak, Iran. Before taking stereo images, a camera path was designed in the greenhouse. This path may be either straight or curved. The designed path was implemented in the greenhouse. The entire path traversed by a stereo camera was 32.7 m and 150 stereo images were taken. Graph-SLAM algorithm was used for Simultaneous Localization and Mapping in the greenhouse. Using the ROS framework, the SLAM algorithm was designed with nodes and network for connecting the nodes.

**Results and Discussion**

For evaluation, the stereo camera locations, every step was measured manually and compared with the stereo camera locations that were estimated in the graph-SLAM algorithm. The position error was calculated through the Euclidean distance ($D_E$) between the estimated points and the actual points. The results of this study showed that, the proposed algorithm has an average of error 0.0679412, standard deviation of 0.0456431 and root mean square error (RMSE) of 0.0075569 for camera localization.

In this research, only a stereo camera was used to prepare a map of the environment, but other researches have used multiple sensor combinations. Another advantage of this research related to others was created a 3D map (point cloud) of the environment and loop closer detection. In the 3D map, in addition to determining the exact location of the plant, the height of the plant can also be estimated. Plant height estimate is important in some agricultural operations such as spot spray, harvesting and pruning.

**Conclusions**

Due to the risk of agricultural activities, the use of robotics is essential. Autonomous navigation is one of the branches of the robotics. For autonomous navigation, a map of environment and localization in this map is need. The purpose of our research was to provide simultaneous localization and mapping (SLAM) in agricultural environments. ROS is a strong framework for solving the SLAM problem. So that, this problem can be solved by combining different nodes in ROS. The method depended only on the information from the stereo camera because stereo camera provided exact distance information. We believe that this study will contribute to the field of autonomous robot applications in agriculture. In future studies, it is possible to use an actual robot in the greenhouse with various sensors for SLAM and path planning.

**Keywords:** Greenhouse, ROS, Simultaneous Localization and Mapping (SLAM), Stereo vision

1- PhD student, Department of Mechanics of Biosystem, Faculty of Engineering & Technology, College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran
2- Professor, Department of Mechanics of Biosystem, Faculty of Engineering & Technology, College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran
3- Professor, Department of Mechanics of Biosystem, Faculty of Engineering & Technology, College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran
4- Former Ph.D. student, Department of Mechanics of Biosystem, Faculty of Engineering & Technology, College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran
(*- Corresponding Author Email: Shahinrafiee@ut.ac.ir)